
Hideg galaktikus molekulafelhők vizsgálata

Spektroszkópiai felmérések és adatbázisépítés a csillagközi anyag
alaposabb megismeréséért

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Varga-Verebélyi Erika

diplomás csillagász

Témavezető: Dr. Tóth L. Viktor

egyetemi adjunktus, Csillagászati Tsz., ELTE



Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi kar
Fizika Doktori Iskola, Részecskefizika és Csillagászat Program
Iskola- és programvezető: Dr. Palla László egyetemi tanár, ELTE

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

2015

Bevezetés

Dolgozatomban a csillagközi anyag (CsKA) legsűrűbb részeinek, a molekulafelhők szerkezetének, tulajdonságainak meghatározásával és elsősorban kinematikájukkal foglalkozom, abból a célból, hogy jobban megértsük a bennük zajló és őket formáló folyamatokat. Mivel a molekulafelhők a csillagkeletkezés helyszínei, vizsgálatom közelebb visz a csillagkeletkezés megértéséhez is.

A molekulafelhők, hasonlóan a CsKA többi fázisához, elsősorban hidrogénből épülnek fel, de sűrűségük elegendően nagy ahhoz hogy az atomos és ionizált hidrogénen kívül belsejükben molekulák (elsősorban H_2) alakuljanak ki. Mivel a H_2 -t közvetlenül igen nehéz észlelni, a molekulafelhőket jelzőmolekulák spektroszkópiai detektálásával szokták megfigyelni:

- A nagyléptékű szerkezet feltérképezésére a szén-monoxid (CO) rotációs átmeneteinek spektrumvonalait szokták használni. Ezekkel a mérésekkel a molekulafelhőn belüli lokális sűrűsödésekről, az ún. molekulafelhő-csomókról kaphatunk képet.
- A molekulafelhők legsűrűbb részei a felhőmagok, amik gravitációsan kötött felhőcsomók. A felhőmagok detektálására az egyik legalkalmasabb molekula az ammónia (NH_3).

Alkalmazott módszerek

Az Archeops ballonos kísérlet, a Planck és Herschel űrtávcsövek távoli-infravörös képeit, valamint a képek alapján készült katalógusok adatait vizsgálva hideg ($T < 20\text{ K}$), pontszerű forrásokat választottam ki abból a célból, hogy feltárjam szerkezetüket és meghatározzam fontosabb paramétereiket.

A molekulafelhők feltérképezéshez a CO különböző izotopomerjeinek¹ rotációs átmeneteihez tartozó spektrumvonalait észleltem az IRAM 30 m-es rádiótávcsővel és a KOSMA 3 m-es szubmilliméteres távcsővel, valamint az Osaka 1,85 m-es rádiótávcsővel végzett méréseket is használtam. A felhőmagok azonosításához az effelsbergi 100 m-es rádiótávcsővel mértem NH₃ spektrumvonalakat.

A detektált vonalak alapján a felhőcsomók szerkezete, sűrűségeloszlása, fontosabb paraméterei (pl. hőmérséklet [K], oszlopsűrűség [cm⁻²], sűrűség [cm⁻³], tömeg [M_☉]) a dolgozatban bemutatott módszerekkel meghatározható és a bennük mérhető sebesség- és féltértszélesség-gradiens (grad(v), grad(Δv) [km/s/pc]), azaz a vonal sebességének és féltértszélességének egy kitüntetett irány mentén való változása, vizsgálható.

Ez utóbbi vizsgálatokkal feltárhatjuk a felhőben zajló turbulens mozgásokat és azok hatását a felhő vagy felhőcsomó fennmaradására, stabilitására, illetve tanulmányozhatjuk a felhőt ért külső hatásokat, melyek például beindíthatják a felhőben a csillagkeletkezést.

A CsKA megfigyelésével kapcsolatos adatok a földi távcsövek folyamatos működésének, illetve az utóbbi évtizedben megszáporodó IR tartományban mérő űreszközöknek köszönhetően egyre csak gyarapodnak. De sokszor még egy-egy műszer mérési adatai közötti keresés is nehézkes, idő és memóriaigényes. Az adatok nincsenek jól rendszerezve, különböző programozási nyelvek és szoftverek használatát, illetve az adott műszerre, mérésre vonatkozó háttérismeretek elsajátítását igényelik.

A Herschel űrtávcső az Európai űrügynökség (ESA) egyik kulcsfontosságú küldetése volt 2009 és 2013 között. Működése során az égbolt közel 10%-át figyelte meg, beleértve számos izgalmas csillagkeletkezési

¹ Ritkább izotópokból felépülő molekulaváltozatok, pl. ¹³CO, C¹⁸O.

területet és molekulafelhőt. A Herschel által készített mérések adatait a Herschel tudományos archívuma (HTA) tárolja, mely nem támogatta a koordináta alapú keresést. Célunk az volt, hogy egy lábnyom-adatbázis létrehozásával kiegészítsük a HTA adatbázisát, ezzel növelve a koordináták és az adatok közötti keresés hatékonyságát.

Tézisek

1. A KOSMA 3 m-es szubmilliméteres és rádiótávcsővel végzett CO-méréseimmel igazoltam, hogy az Archeops ballonos kísérleti távcső távoli infravörös képein hideg forrásként azonosított objektumok többségében tényleg a molekulafelhők lokális sűrűsödései, vagyis sűrű, hideg molekulafelhő-csomók. Ezen eredmény hozzájárult annak az elképzelésnek a bizonyításához, hogy pusztán távoli IR képek felhasználásával is meg lehet találni a hideg molekulafelhőket. [1]
 - Meghatároztam 13 Archeops forrás szerkezetét, definiálva az azokban található sűrű felhőcsomók pozícióját, méretét, hőmérsékletét és sűrűségét.
 - Négy felhőben összesen 10 esetben sikerült egyértelműen $\text{grad}(v)$ -t és 9 esetben $\text{grad}(\Delta v)$ -t kimutatni (több spektrumvonalon is), melyek a felhőket ért külső hatásokról árulkodnak.
2. A Planck űrtávcső képein detektált 2 IR objektum (PCC249, PCC288) több pontjában detektáltam NH_3 (1,1) és (2,2) színkép vonalakat az effelsbergi 100 m-es rádiótávcsővel, és meghatároztam ezen mérési pontokban a gáz kinetikus hőmérsékletét. Munkámmal igazoltam, hogy az objektumok sűrű és hideg

molekulafelhő-magok, melyekben csillagkeletkezés történhet. [2]

- Precíz molekulavonal-kalibráció elvégzése céljából meghatároztam az effelsbergi 100 m-es rádiótávcső 23 GHz-en működő detektorának magasságfüggő erősítési görbét. Az általam meghatározott erősítési görbe 45° feletti magasságokban akár 10-15 %-kal javította a magasságfüggő kalibrációs tag számítási pontosságát.
- A két objektum összesen 8 különböző pontjában sikerült NH_3 (1,1) és (2,2) vonalakat mérnem, majd hiperfinom vonalprofil-illesztéssel igazoltam, hogy hideg ($T_{\text{kin}} < 17$ K) objektumokat, 4 esetben a sűrűségbecslés alapján felhőmagokat találtunk.

3. Tizenkét, a Planck űrtávcső képein detektált objektumot térképeztem fel az IRAM 30 m-es rádiótávcsővel végzett CO-méréseimmel. Egy kiválasztott forrás részletes elemzésével különböző paraméterszámítási módszereket vettem össze, tesztelve azok használhatóságát. [3]

- A Herschel űrtávcső 250, 350 és 500 μm -es képeit, valamint a ^{13}CO (1-0), ^{13}CO (2-1) és C^{18}O (1-0) spektrumtérképeket felhasználva a G130.38+11.25 jelű forrásban két sűrű csomót azonosítottam, melyekről igazoltam, hogy felhőmagok.
- Az újonnan azonosított felhőmagok paramétereit a hagyományos, lokális termodinamikai egyensúlyt feltételező analitikus módszerrel, továbbá egy modern radiatív transzfer kóddal is meghatároztam. A kapott paramétereket összevetve a gerjesztési hőmérsékletben, optikai mélységben és ^{13}CO oszlopsűrűségben jó egyezést tapasztaltam a két modell között, a H_2 sűrűségben viszont jelentős eltérés mutatkozott.

- A kiválasztott G130.38+11.25 jelű forrás egy ismert csillagkeletkezési régióban (L1340), a Cep OB4 szupernóvabuborék falában helyezkedik el. A felhőben mindegyik észlelt spektrumvonalon kimutatható a $\text{grad}(v)$ és a $\text{grad}(\Delta v)$ is. Ezek alapján feltételezhető, hogy a felhőben indukált csillagkeletkezés zajlik.
4. A Planck galaktikus hideg felhőcsomó katalógusból kiválasztott 184 forrás részletes kinematikai vizsgálata során meghatároztam a csomókban mérhető $\text{grad}(v)$ és $\text{grad}(\Delta v)$ irányát, hosszát és nagyságát, melyhez az oszakai 1,85 m-es rádiótávcsővel végzett ^{12}CO és ^{13}CO molekulaszpektroszkópiai méréseket használtam fel. Kimutattam a mintában a sebességszórás – méret összefüggést (vagyis Larson 1. törvényét), és elkészítettem a csomók átlagspektrumait. [8, 9]
- Saját eljárás kidolgozásával elkészítettem 40 mérési terület oszlopsűrűség és sebességtérképeit, melyek alapján vizsgálni lehet a felhőcsomókat tartalmazó felhők szerkezetét, sűrűség- és sebességeloszlását.
 - Ugyancsak saját módszert dolgoztam ki a felhőcsomókban mérhető $\text{grad}(v)$ meghatározásához. A $\text{grad}(v)$ meghatározását az általam elkészített sebességtérképek alapján manuálisan és automatikusan is elvégeztem. A két módszer legmegbízhatóbb illesztései alapján elkészítettem egy táblázatot, mely a ^{12}CO és ^{13}CO mérésekhez tartozó $\text{grad}(v)$ és $\text{grad}(\Delta v)$ paramétereit tartalmazza.
 - A 184 felhőcsomó átlagspektrumában összesen 249 vonalkomponenst illesztettem Gauss-profillal, és ebből meghatá-

roztam a sebességet, félértékszélességet, valamint a vonalprofil paramétereit.

- Megbecsültem a felhőcsomókon belül mérhető sebesség- és félértékszélesség-diszperziót, ami alapján ki tudtam mutatni a mintában sebességszórás – méret relációt, mely jó egyezést mutat az irodalmi adatokkal.

5. Munkatársaimmal létrehoztuk a Herschel űrtávcső képalkotó műszerei által lemerített területeteket tartalmazó lábnym-adatbázist és webszolgáltatást, amivel gyorsan és hatékonyan megtudható, hogy például egy adott molekulafelhőről készült-e Herschel távoli IR mérés vagy sem. [7, 10]

- Egységes adatbázis-sémát dolgoztam ki a Herschel különböző műszereiből származó képalkotó és spektrális mérések fejlődésének tárolására. Elvégeztem az adatok letöltését, feldolgozását és adatbázisba szervezését.
- Részletes távcsőirányzási információkat gyűjtöttem össze, melyek alapján a műszerek által lefedett területek rekonstruálhatóak voltak. Ezeket az adatbázisba töltöttem.

6. Optimalizált lekérdezési módszert hoztam létre SQL-adatbázisokban átfedő régiók megtalálásához. A lekérdezés a HTM-indexek bitmaszkolásán alapul, így szélesebb körben is alkalmazható módszer. [10]

Következtetések

A sűrű, hideg molekulafelhő-csomók megtalálására a távoli IR mérések kitűnően használhatók, detektálásaik alapján spektroszkópiai mérések

végezhetőek a felhőcsomók szerkezetének tanulmányozására. Az általam bemutatott módszerekkel és mérésekkel feltérképezhetőek a leg-sűrűbb hideg felhőmagok, a paraméterek kiszámításával pedig megbecsülhető a felhőmagban rejlő anyag hőmérséklete, tömege és állapota. Részletes spektrumtérképekkel lehetőség nyílik a sebességtér vizsgálatára is, ami a gáz turbulens mozgásáról ad információt. Ezekkel a vizsgálatokkal ki lehet válogatni a lehetséges csillagkeletkeztető felhőmagokat. A munka folytatásaként a kiválasztott felhőmagok poros magjában megbújó fiatal csillagszerű objektumokat kereshetünk közeli IR felmérések adataiban. Így megfigyelhetjük a különböző feltételek mellett történő csillagkeletkezés legkorábbi fázisait, és megállapíthatjuk a csillagkeletkezést elősegítő vagy hátráltató tényezőket, ami közelebb visz a Tejútrendszerben lévő csillagok sokféleségének megértéséhez.

Manapság a „csillagászati mennyiségű adatok” korát éljük, így már nem az adatok hiányától kell tartanunk, hanem attól, hogy a rengeteg adat között nem találjuk meg a számunkra megfelelőt. A különböző adatbázisok, mint például az általunk létrehozott Herschel lábnyom-adatbázis használatával sokkal hatékonyabban kereshetünk egy adott távcső adatai között, ami jelentősen megkönnyíti és meggyorsíthatja a kutatásunkat. A végső cél egy általánosan használható, nagy csillagászati adatbázis létrehozása lehet, ahonnan bármelyik műszer mérési adataihoz hozzáférhetnénk. A jelenlegi adatbázisok összekapcsolásával ez a cél a nem túl távoli jövőben megvalósíthatónak tűnik.

Publikációim a témában

- [1] Verebéli, E., Miller, M., Tóth, L. V., Makai, Z., & Marton, G. 2010, *Journal of Physics Conference Series*, 218, 012023
- [2] Juvela, M., Ristorcelli, I., Montier, L. A., Marshall, D. J., Pelkonen, V.-M., Malinen, J., Ysard, N., Tóth, L. V., Harju, J., Bernard, J.-P., Schneider, N., Verebéli, E., Anderson, L., André, P., Giard, M., Krause, O., Lehtinen, K., Macias-Perez, J., Martin, P., McGehee, P. M., Meny, C., Motte, F., Pagani, L., Paladini, R., Reach, W., Valenziano, L., Ward-Thompson, D., Zavagno, A. 2010, *A&A*, 518, L93
- [3] Verebelyi, E., & Pagani, L. 2013, *IAU Symposium*, 292, 115
- [4] Verebéli , E., Könyves, V., Nikolić, S., et al. 2013, *Astronomische Nachrichten*, 334, 920
- [5] Marton , G., Verebéli, E., Kiss, C., & Smidla, J. 2013, *Astronomische Nachrichten*, 334, 924
- [6] Tóth, L. V., Zahorecz, S., Marton, G., & Verebéli, E. 2015, *Highlights of Astronomy*, 16, 579
- [7] Verebéli, E., Dobos, L., & Kiss, C. 2015, *IAU General Assembly*, 22, 36977
- [8] Verebéli, E. 2015, *IAU General Assembly*, 22, 57370
- [9] Varga-Verebéli, E., Tóth, L. V., Marton, G., Marshall, D., Dobashi K., Shimoikura, T. 2015, in prep.
- [10] Dobos, L., Varga-Verebéli, E., Budavári, T., & Kiss, C. 2015, in prep.